

## トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

藤澤利正 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

本計画研究では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」の輸送現象に注目しています。個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることや、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としています。下記で、最近のトピックスを紹介します。

### 1. 量子ホール朝永ラッティンジャー流体の非平衡準安定状態の観測

藤澤 (CO1 代表)、橋坂 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、量子ホールエッジチャンネルによるカイラル朝永ラッティンジャー流体における非平衡準安定状態の観測に成功しました [1]。これは、カイラル1次元系の特徴を生かして、可積分系である朝永ラッティンジャー流体の非平衡状態が長く安定に留まる現象を実験的に検証したものです。図1(a)は実験系の模式図を示しており、ランダウ占有率2の整数量子ホール状態

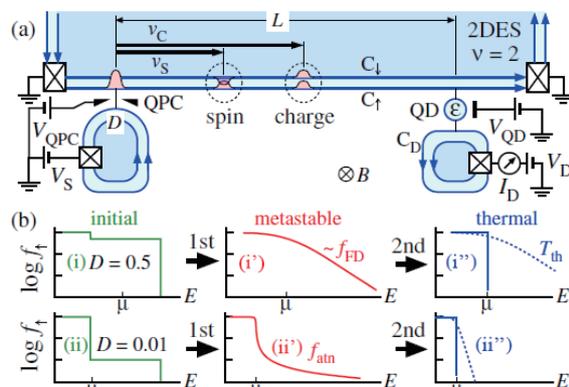


図1. 量子ホール朝永ラッティンジャー流体の非平衡準安定状態の観測。(a) 実験の模式図。(b) 各スピンのエネルギー分布関数の変化 (模式図)。[1]。スピン電荷分離で非平衡準安定状態に達し (1st)、外界との結合により安定な熱平衡状態に近づく (2nd)。

態において、スピンアップとダウンの2つのチャンネル ( $C_{\uparrow}, C_{\downarrow}$ ) が相互作用している系を用意します。まず、量子ポイント接合 (QPC) から透過率  $D$  でスピンアップの電子を注入することで、図1(b)の (i) または (ii) のような階段状のエネルギー分布関数をもつ初期状態の用意ができます。しかし、わずかに  $0.5 \mu\text{m}$  程度の距離を伝搬すると、クーロン相互作用に起因するスピン電荷分離によって、(i') または (ii') のような分布関数をもつ準安定状態に達します。特に、透過率が非常に小さい場合には、熱平衡状態 (フェルミ分布関数) と明らかに異なる arctan 型の分布関数 (ii') に至ることを明らかにしました。この非平衡状態は比較的長く ( $20 \mu\text{m}$  程度) 維持されることから、準安定状態とみなすことができ、一次元電子系の興味深い現象を示しています。

### 2. InAs/InGaSb 2次元トポロジカル絶縁体におけるゼロ磁場スピン分裂の観測

入江 (CO1 連携研究者)、秋保 (CO1 連携研究者)、村木らは、2次元トポロジカル絶縁体である InAs/InGaSb 複合量子井戸のキャパシタンス測定により、バルク状態のゼロ磁場スピン分裂の観測に成功しました。量子井戸 - 表面ゲート間のキャパシタンスは2次元の状態密度を反映し、図2のように電荷中性点でフェルミ準位がギャップをよぎる際に dip を示します。注目すべき点は、

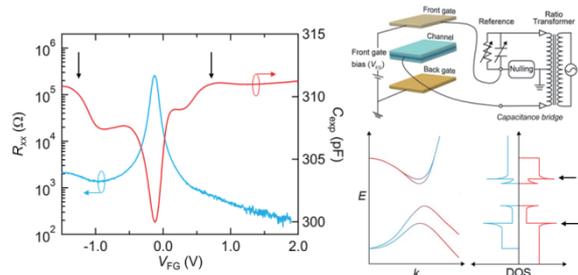


図2. 左: InAs/InGaSb 量子井戸の縦抵抗 ( $R_{xx}$ ) とキャパシタンス ( $C_{\text{exp}}$ ) のゲート電圧依存性。右上: 測定配置。右下: バルクのエネルギー分散と対応する状態密度の模式図。

## TOPICS

その両側でキャパシタンスが階段状に変化していることです。これは、ヘテロ構造が空間反転対称性を持たないため、スピン軌道相互作用によってゼロ磁場においてもバンドがスピン分裂し、バンド端で状態密度が大きく変化するため生じるものです。特に伝導帯側で観測されたスピン分裂は  $k \cdot p$  計算から予想される値よりも1桁ほど大きく、従来の理論には含まれない強いスピン軌道相互作用が存在することを示しています。さらにこのスピン軌道相互作用によってトポロジカル相転移の性質が質的に変化することも明らかになりました。

### 3. スピン軌道ロックングを用いた電子スピン制御

好田 (C01 分担者) らは、2次元 Rashba 系やトポロジカル絶縁体に存在するスピン軌道ロックングを用いた、新たなスピン制御法を実現しました [2]。半導体におけるスピン軌道相互作用は、電子スピンに対し有効磁場を与えます。よって、これまでスピン歳差運動制御が実現されてきました。スピン軌道ロックングを用いる場合、電子軌道とスピン方向が結合するため、電子軌道の精密制御により、歳差運動とは全く異なる原理で、スピン方向制御が可能となります。Rashba スピン軌道相互作用の強い InGaAs 2次元電子ガスを用いて、量子ポイントコンタクト (QPC) が並列に接続された磁気フォーカシング素子を作製し (図 3)、低温におけるスピン依存伝導度を評価しました。弱い面直磁場 ( $B_{op}$ ) により電子が半円軌道を描くと、エミッタ QPC を出た電子スピンの 180 度回転してコレクタ QPC に到着することを実験的に見出しました。理論計算とも良い一致を示し、スピン

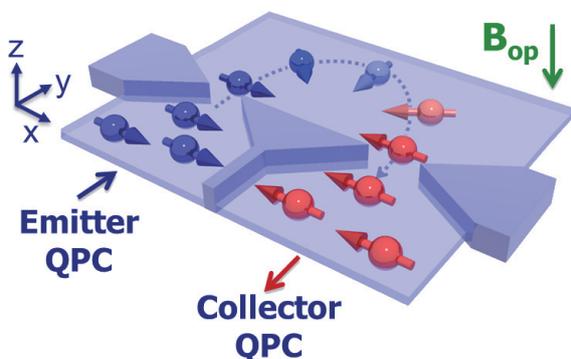


図 3. スピン軌道ロックングによるスピン制御を行う磁気フォーカシング素子の概略図 [2]。

軌道ロックングによりスピン方向制御が実現できたことを意味します。このスピン制御法は、常にスピン方向が有効磁場と平行であることから、Dephasing を抑制した効率的なスピン制御手法になり得ます。

### 4. 磁性ワイル半金属中のスピントクスチャー

野村 (C01 分担者) らは、磁性ワイル半金属中のスピントクスチャーによる新規現象を探索しました。図 4 のような磁壁の近傍に電荷が蓄積すること [3]、磁壁の運動によって電流が発生すること [4] を明らかにしました。さらに磁壁を貫く電流に対する磁気抵抗効果が通常の強磁性金属に比べて堅牢であり、乱れに対してヘリシティによって守られることを明らかにしました [5]。またトポロジカル半金属の磁化率がスピン軌道相互作用によって増強されること [6]、さらにトポロジカルディラック半金属ではスピン軌道交差磁化率が波数空間のトポロジーによって決まることを明らかにしました [7]。

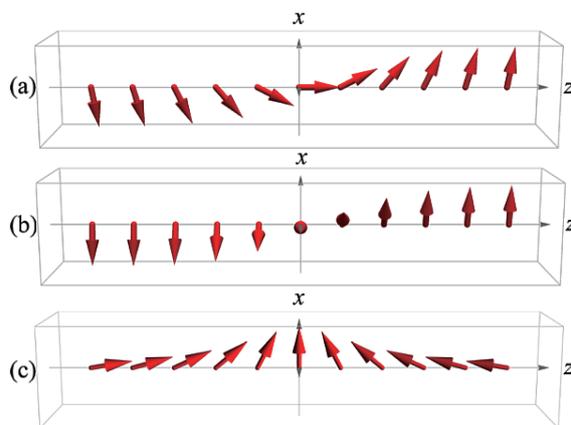


図 4. 磁性ワイル半金属中の (a) Neel 型磁壁、(b) Bloch 型磁壁、(c) head-to-head 型磁壁。

### 5. 高次トポロジカル絶縁体の物理

江澤 (C01 分担者) は、高次トポロジカル絶縁体の研究を行いました。高次トポロジカル絶縁体はトポロジカル絶縁体の拡張であり、面やエッジではなく、コーナーやヒンジにトポロジカル境界状態が現れることが特徴です。特に図 5(b) に示してある Breathing カゴメ格子と Breathing パイロクローア格子では SSH 模型を拡張した高次トポロジカル絶縁体を実現していることを予言しまし

た [8]。この系では図 5(e) に示すワニエ中心が量子化し、トポロジカル数になります。これは音響システムやマイクロ波導波路で実験的にのちに実証されました。また、図 5(h) にあるような LC 回路でこれらが実装できることを理論的に示しました [9]。この系ではコンデンサーがホッピング、コイルがオンサイトポテンシャルに対応しています。特にコーナー状態がインピーダンス共鳴を用いて測定できることを示しました。可変コンデンサーを調整することでトポロジカル相転移を観測可能です。

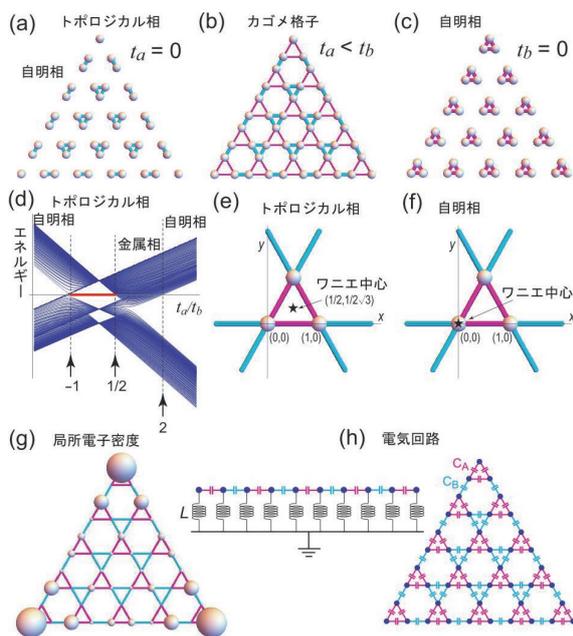


図 5. 高次トポロジカル絶縁体のモデル。

### 6. アンドレーフ近藤状態における非平衡ゆらぎ

小林研介 (C01 連携研究者) らは超伝導体に接続された量子ドットにおけるアンドレーフ近藤効果について研究しました [10]。量子多体系特有のスピナー重項状態である近藤状態とクーパ対が共存しているときに、非平衡ゆらぎが異常に増大することを明らかにしました。

その他、トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象に関する実験・理論研究を進めました [11-23]。

- [1] "Signatures of a Nonthermal Metastable State in Copropagating Quantum Hall Edge Channels", Kosuke Itoh, Ryo Nakazawa, Tomoaki Ota, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 197701 (2018).
- [2] "Spin-momentum locked spin manipulation in a two-dimensional Rashba system", M. Kohda, T. Okayasu, J. Nitta, Scientific Reports volume **9**, 1909 (2019).
- [3] "Localized charge in various configurations of magnetic domain wall in Weyl semimetal", Y. Araki, A. Yoshida, K. Nomura, Phys. Rev. B **98**, 045302 (2018).
- [4] "Charge pumping induced by magnetic texture dynamics in Weyl semimetals", Y. Araki, K. Nomura, Phys. Rev. Applied **10**, 014007 (2018).
- [5] "Helicity-protected domain-wall magnetoresistance in ferromagnetic Weyl semimetal", K. Kobayashi, Y. Ominato, K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073707 (2018).
- [6] "Spin susceptibility of three-dimensional Dirac semimetals", Y. Ominato, K. Nomura, Phys. Rev. B **97**, 245207 (2018).
- [7] "Spin-orbit crossed susceptibility in topological Dirac semimetals", Y. Ominato, S. Tatsumi, K. Nomura, arXiv:1809.10852.
- [8] "Higher-order topological insulators and semimetals on the breathing Kagome and pyrochlore lattices", M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 026801 (2018).
- [9] "Higher-order topological electric circuits and topological corner resonance on the breathing Kagome and pyrochlore lattices", M. Ezawa, Phys. Rev. B **98**, 201402(R) (2018).
- [10] "Enhanced Shot Noise of Multiple Andreev Reflections in a Carbon Nanotube Quantum Dot in SU(2) and SU(4) Kondo regimes", T. Hata, R. Delagrangé, T. Arakawa, S. Lee, R. Deblock, H. Bouchiat, K. Kobayashi and M. Ferrier, Phys. Rev. Lett. **121**, 247703-1-5 (2018).

## TOPICS

- [11] "Electronic energy spectroscopy of monochromatic edge magnetoplasmons in the quantum Hall regime", T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki and T. Fujisawa, *J. Phys. Cond. Mat.* **30** 345301 (2018).
- [12] "Tomonaga–Luttinger-liquid nature of edge excitations in integer quantum Hall edge channels", Masayuki Hashisaka and Toshimasa Fujisawa, *Reviews in Physics* **3**, 32 (2018).
- [13] "Generation and detection of edge magnetoplasmons in a quantum Hall system using a photoconductive switch", C. J. Lin, K. Morita, K. Muraki, and T. Fujisawa, *Japan. J. Appl. Phys.* **57**, 04FK02 (2018).
- [14] "Coupling between quantum Hall edge channels on opposite sides of a Hall bar", N. H. Tu, M. Hashisaka, T. Ota, Y. Sekine, K. Muraki, T. Fujisawa, N. Kumada, *Solid State Commun.* **283**, 32-36 (2018).
- [15] "Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption", Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, K. Nomura, T. Takahashi, S. Hasegawa, *J. Phys.: Condens. Matter* **30**, 305701 – 1-7 (2018).
- [16] "Topological switch between second-order topological insulators and topological crystalline insulators", M. Ezawa, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 116801 (2018).
- [17] "Strong and weak second-order topological insulators with hexagonal symmetry and  $Z_3$  index", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **97**, 241402(R) (2018).
- [18] "Minimal model for higher-order topological insulators and phosphorene", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **98**, 045125 (2018).
- [19] "Magnetic second-order topological insulators and semimetals", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **97**, 155305 (2018).
- [20] "Topological quantum quench dynamics carrying arbitrary Hopf and second-Chern numbers", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **98**, 205406 (2018).
- [21] "Dynamics of a magnetic skyrmionium driven by spin waves", Sai Li, Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Wang Kang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Weisheng Zhao, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 142404 (2018).
- [22] "Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmion Induced by a Magnetic Anisotropy Gradient", Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, *Phys. Rev. B* **98**, 134448 (2018).
- [23] "Fano effect in the transport of an artificial molecule", S. Norimoto, S. Nakamura, Y. Okazaki, T. Arakawa, K. Asano, K. Onomitsu, K. Kobayashi and N.-h. Kaneko, *Physical Review B* **97**, 195313-1-8 (2018).